专题：中国能源发展战略研究
Study on China's Energy Development Strategy

引用格式：邹才能, 陈艳鹏, 熊波, 等. 碳中和目标下中国新能源使命. 中国科学院院刊, 2023, 38(1): 48-58, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20220831001.
Zou C N, Chen Y P, Xiong B, et al. Mission of new energy under carbon neutrality goal in China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 48-58, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20220831001. (in Chinese)

碳中和目标下中国新能源使命

邹才能　陈艳鹏　熊 波　刘翰林*
中国石油勘探开发研究院 北京 100083

摘要　减少温室气体排放、遏制全球气温上升，努力实现碳中和目标是人类面对气候变化危机的主动作为和共同追求。碳中和是涉及多学科多领域的庞大系统工程，实现碳中和目标需要坚实的理论基础和科学方法的指导，碳中和学应运而生。碳中和学的理论内涵包含两个“动态平衡”——全球碳排放与碳吸收之间的动态平衡、人类发展与自然环境之间的动态平衡；技术内涵包括人类生产生活引起的二氧化碳排放、捕集、利用、封存和移除的全过程及相关的技术体系。能源消费结构从以化石能源为主向以新能源为主的转型，世界能源生产与消费结构将由当前煤炭、石油、天然气和新能源的“四分天下”，向以新能源为主的“三小一大”新格局发生根本性转变；在此过程中，需构建煤炭、石油、天然气、新能源多种能源协同发展。中国能源生产与消费结构，也将从当前以煤炭能源为主的“一大三小”，向未来以新能源为主的“三小一大”格局发生革命性转变；新能源将主导我国能源生产与消费结构转型，最终将力争实现以新能源为主体的“能源独立”。但在能源发展中，始终把能源转型与能源安全放在同等重要位置。发展新能源是实现碳中和社会、建设绿色宜居地球的关键。碳中和下新能源是世界能源转型的方向、能源科技创新的前沿、能源强国建设的主力、绿色地球建设的动力，肩负能源转型、能源安全和“能源独立”的使命。当整个人类社会都被纳入碳中和体系，我们将获得并长久拥有一个绿色宜居地球。

关键词　碳达峰，碳中和，碳中和学，新能源，能源转型，能源独立，碳中和社会

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20220831001

全球气候问题正在对地球生态环境产生深刻影响，气候变化所涉及的政治、经济、环境、科学和外交等综合性战略问题，目前已经成为全人类共同面临的巨大历史挑战。在人类出现之前的地质历史时期，发生过不计其数的重大地质事件，如超级火山爆发、超大陆聚合、造山运动、天体撞击地球、“雪球地球”事件等，它们均会在一定程度上引发古大气中二氧化碳（CO_2）浓度的突变，从而影响某一地质历史时期的地球表面温度，进而可能产生极冰面积变化、全球性海平面变化、净初级生产量变化以及生物大灭

*通信作者
修改稿收到日期：2022年10月24日；预出版日期：2022年12月14日

绝等多重连锁效应[1]。随着工业化时代大门的开启，人类大规模的化石燃料利用和森林砍伐所导致的绿植数目锐减，促使全球大气中 CO_2 平均浓度达到了近百万年以来的最高水平，以至“热岛效应”“温室效应”对地球生态系统和人类社会发展均构成了严重威胁。2021 年，全球极端高温天气频发，15 个“气候临界点”已被激活 9 个[2]，由自然灾害引起的灾难性事故造成了 2 521 亿美元的损失[3]。到 21 世纪末，假如全球平均温度提升高达 2℃，气候方面：飓风风暴将更加频繁、土地荒漠化程度加剧，海平面水位上升高度可达 36—87 厘米，旱季延长，同时降水量可能下降 14%；生态系统方面：全球珊瑚礁数量下降 99%，全球约 13% 的陆地生态系统失去生态系统完整性，许多现存的动、植物种类和数量均会受到严重威胁。因此，减少 CO_2 等温室气体的排放乃至实现负排放，控制全球气温上升幅度，已然成为全人类“绿色地球，绿色家园”建设的共同目标。2021 年，全球能源燃烧和工业过程产生的 CO_2 排放量创下历史新高，达到 363 亿吨[4]，能源相关 CO_2 排放增量超过 20 亿吨，超过 2010 年成为绝对值同比增幅最大的一年。能源作为全球经济发展物质基础，同时也成为全球 CO_2 减排过程中无法规避的重要领域。

1 碳中和目标下的能源发展要求

气候变化不断为人类社会敲响警钟，实现碳中和对全球气温快速提升发挥着重要控制作用，同时碳中和目标将在推动能源绿色低碳转型方面发挥重要作用[5]。碳中和目标符合能源学研究主旨，从资源角度揭示地球系统内化石能源与非化石新能源共生分布关系、碳系能源与氢系能源有序接替转型、能源体系与绿色地球和谐发展的自然变化规律。完成能源消费结构从化石能源为主体向零碳新能源为主体的转型，是实现碳中和目标的首要任务[6]。

1.1 碳中和对能源发展的指导意义

为应对全球气候极端变化趋势，碳中和已经成为共识性目标，其既是人类维护生态环境的基本举措，也是全人类去碳化能源革命和生态化科技革命，它必将给人类社会和经济的发展带来一场全新的改革。从能源革命的角度来看，碳中和必然会加速世界能源体系向着“低碳化”和“无碳化”的方向转型；与此同时，世界能源消费结构也将从根本上由“四分天下”格局（煤炭、石油、天然气和新能源①）转变为“三小一大”格局（以新能源为主）。从科技革命的角度来看，目前世界正处在新一轮科技革命和产业变革进程中，生物工程技术、空间技术、智能化技术和原子能技术等成为主要技术标志，新材料、新能源、生物工程、信息技术等成为主要技术领域。实现碳中和在人类命运共同体建设中具有里程碑意义，将大幅提升人类幸福感，为建设人类生态文明与宜居地球作出重要贡献。在碳中和目标下，人类社会政治、经济、文化等领域均将受到深远影响和重大变革。

当前，世界各国对能源系统的投入正在逐步由化石能源向可再生能源过渡，根据国际可再生能源机构（IRENA）发布的预测，到 2050 年全球实现净零碳排放，可再生能源将占能源系统总投资的 29%，而化石能源仅占 17%[7]。在碳中和目标下，人类能源消费结构必将由“一次能源”占绝对优势向“二次能源”占绝对优势过渡，电能也必将成为能源的主要载体。到 2050 年，我国建筑行业的直接电气化率、交通运输产业电气化率、电动汽车销售量与保有量，以及其他产业电气化水平持续提高，这些都会对人类生活产生根本性改变和深层影响。碳中和将促使能源从资源依赖转向技术依赖，实现人与自然和谐共生，建设人类的绿色宜居地球。

① 含水电、核电，后同。

碳中和为人类社会发展与经济增长提供了源源不竭的新动力，可再生能源的加速利用及能源转型将推动能源复苏。预计到2050年，碳中和将贡献全球2.4%的国内生产总值（GDP）增长。其中，世界范围内与可再生能源有关的就业岗位将会增加3倍，高达4 200万个；与能源有关的工作岗位也将增长到1亿个，与目前的就业岗位相比，增幅达72%。

为了应对全球气候问题，碳中和在国际关系中的作用已超越传统地缘政治范畴，从而成为人类命运共同体建设中具有里程碑意义的议题。全球有必要构建一个基于共赢、生态化、互信、合作、协同、参与和分享的科技创新、国际合作新格局，更有必要提倡“人类命运共同体”的意识。建立在碳中和目标基础上，并得到保证的生态文明，将使人类物质文明和地球生态系统达到和谐统一。

1.2 碳中和的历程

1992年5月，全球首个控制CO_2排放和解决全球气候变暖问题的国际公约——《联合国气候变化框架公约》（*United Nations Framework Convention on Climate Change*，以下简称《公约》）是联合国政府间谈判委员会通过的。1994年3月21日，《公约》生效，其目标是人为控制大气中温室气体的浓度，防止气候系统受到温室气体的危害。

1997年12月，《公约》第3次缔约方大会通过了第1部限制各国温室气体排放的国际法案——《京都议定书》，其目的是限制发达国家的温室气体排放，从而遏制全球气候变暖。

2015年12月，《公约》第21次缔约方大会暨第21届联合国气候变化大会最终达成《巴黎协定》。为实现《巴黎协定》确定的温控目标，全球温室气体排放要求到2030年前削减一半，2050年前后实现“净零排放”，即“碳中和”[1]。

《全球升温1.5℃特别报告》由联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）于2018年10月发布，该报告厘清了全球升温1.5℃可能带来的影响，以及可能采取的减排路径，为可持续发展与努力消除贫困的同时强化全球响应建言献策②。

1.3 实现碳中和面临问题和挑战

碳中和应对全球气候变化问题已经成为全球共识，但各个国家在实施过程中必然会面临环境、政治、资源、技术、市场、能源结构等多方面挑战。

（1）*环境层面*。美国夏威夷的冒纳罗亚太阳天文台（MLSO）作为全世界CO_2浓度连续观测站，2021年4月检测值高达421.21×10^{-6}③，成为全球有记录以来的极值，且较工业化前水平高出50%。全球大气中CO_2含量的持续增加，对海洋生态系统中非钙化自养生物具有一定促进作用，从而可在一定程度上提升水体初级生产力，并有效增加海洋生物固碳能力[8]。但是，海洋中CO_2含量的持续高水平必然会对水体酸化程度及生物种群分布带来巨大的负面影响。在陆地生态系统方面，尽管高CO_2浓度促进陆地碳汇，但陆地生态系统的碳汇功能将随着各国碳中和战略的持续发力，由持续上升转为持续下降并最终趋于零[9]。因此，全球CO_2浓度的持续增加对海洋生态系统和陆地生态系统的影响是极其复杂的，仍有大量未知有待解决。

（2）*政治层面*。截至2021年10月，全球137个国家对实现碳中和的时间作出明确承诺；其中已立法国家只包括德国、日本、丹麦、法国、爱尔兰、西班牙等在内的18个国家④，占比仅13%。在碳中和立法国家中，丹麦议会在2019年通过了首部《气候法案》，制定了2050年实现净零排放的明确目标；

② United Nations. Paris Agreement. (2015-12-12)[2022-10-06]. http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf.

③ Global Monitoring Laboratory. [2022-10-03]. https://gml.noaa.gov/dv/data/.

④ Net zero numbers. [2022-06-29]. https://zerotracker.net/#companies-table.

但2022年哥本哈根市阿迈厄岛资源中心（Amager Resource Centre）的碳捕集和封存计划未能如期推进，该市市长索菲·安诺生在同年8月宣布哥本哈根暂时放弃2025年实现碳中和目标。德国在2021年通过了《联邦气候保护法》修订案，不仅将该国碳中和时间提前到2045年，还明确了不同行业的减排目标；但在国际地缘冲突和欧洲能源形势等多因素影响下，2022年7月德国联邦议院（下议院）通过了《可再生能源法》修订案——燃煤和燃油发电机组可能重返电力市场，进而推迟了原计划2035年前实现100%可再生能源发电的目标。

（3）能源结构层面。在世界能源消费结构中，新能源增长速度虽已超过整体能源增长速度，但全球能源消费结构仍以化石能源为主。但是，煤炭、石油、天然气、新能源“四分天下”格局短时间内难以打破，其中17%的新能源占比仍处于较低水平，新能源占比的提升为能源转型带来巨大的挑战。

（4）资源层面。由于全球近地层风速和地表太阳辐射存在显著的年代际变化和区域差异[10]，且全球气候变化也会相应影响太阳能和风能资源的分布：随着全球变暖的加剧，南半球和热带地区的平均近地风能将有所增大，而北半球中纬度地区则与之相反；随着全球变暖的加剧，以欧洲地表太阳辐射变化趋势为例，其中部和南部的太阳辐射整体增幅5%—10%，而东部和北部最大下降可达15%[11]。因此，全球陆地太阳能、风能等新能源分布极不均匀，具有间歇性，同时这些间歇性能源还具有时空互补性差异较大的特点[12]，这给新能源的规模化发展带来了极大的挑战。

（5）技术层面。电气结构、支架结构及人工成本的变化空间较大使得光伏太阳能发电成本具有较高单价跨度；风力发电初始投资成本构成中的风机购置、工程安装及建筑工程等费用仍处于较高水平。因此，以太阳能和风能为代表的新能源发电总体的价格整体仍然高于煤发电，其峰谷稳定性和调峰技术均需要进一步改革、创新。氢燃料电池是长途运输和重工业等领域电气化的最佳选择，但膜电极组件（质子交换膜、催化剂、气体扩散膜等）、双极板和氢燃料电池系统的技术成熟度仍需要重点攻关。碳捕集、利用和封存/碳捕集和封存（CCUS/CCS）技术的推广和普及会受到应用场景和地质条件等情况的约束，加之CCUS/CCS技术目前表现出的高成本、高能耗特点，其技术研发仍需加强，成本能耗亟须降低。储能技术无论从规模、成本还是寿命上都不能充分满足应用的需要，其产品安全标准体系也亟待完善，其部分核心技术还处于原型阶段——液流电池储能、本质安全水系锌离子电池等新型储能技术并未完全实现规模化应用。氢能、CCUS/CCS和储能等技术规模商业化的推广应用还存在各式各样的挑战。

（6）市场层面。新能源市场逐渐由起步萌芽期向快速发展期转变，这与新能源的成本连年降低及应用便利程度不断增加密切相关。虽然，目前新能源的技术成本与化石能源相比缺乏显著竞争力，这与新能源的配套设备不足且使用不便，以及化石能源的成本优势具有密切关系[13]；但是，伴随着新能源新兴产业链的不断完善，全球市场机遇的增加与突破性技术创新的涌现将不断凸显新能源成本优势。

2 碳中和学概念及理论技术框架

广义上，碳中和是指人类化石能源利用、土地利用及自然界碳排放等碳源体系与地球碳循环系统、海洋碳溶解、生物圈碳吸收等碳汇体系间形成动态平衡；狭义上，是指一个组织、团体或个人在一段时期内CO_2的排放量，通过森林碳汇、人工转化、地质封存等技术抵消，从而实现CO_2“净零排放”。碳中和学是研究人类活动足迹对自然环境影响最小化的一门学科，研究对象是以CO_2为核心的地球、气候、能源和人类之间有效的协同发展。

2.1 碳中和学的提出

全球自然灾害形势复杂，极端气候灾害事件多发，碳中和是应对气候变化的必然之路和有效措施。碳中和是一项涵盖节能提效、减碳固碳、科技创新、应急储备和政策支撑的重大协同工程。这项系统性、革命性、多维度、多领域的协同战略工程需要统筹协调、明确路径、综合施策，重点把握理论基础的稳固性和指导方法的科学性。2021年，笔者团队首次提出了“碳中和学”的概念[1]，尝试建立碳中和学的理论体系，形成碳中和学的技术内涵及框架体系，构建实现碳中和五大战略工程的科学体系，以期助力碳中和目标如期实现。2022年，笔者团队将地球系统中的“碳”分为3类——黑碳、灰碳和蓝碳；3种“碳”在地球系统内部相互转化，减小黑碳比例、提高灰碳特别是蓝碳比例是推动碳中和的关键[14]。碳中和学体现碳中和愿景下，建设“绿色地球、宜居家园”的生态文明需求。碳中和学技术框架主要包括碳科学技术和碳经济技术。

2.2 碳中和学的概念、内涵

碳中和学是以碳循环为主线，重点研究宜居地球、能源利用、人类幸福的绿色协同与可持续发展，依托五大理论和技术体系支撑，是实现 CO_2 利用与“净零排放”的一门学科。理论体系主要包括气候变化理论、碳平衡理论、能源理论、碳中和经济理论和战略理论；技术体系主要包括无碳或减碳关键技术、零碳排关键技术、负碳排关键技术、碳排放评价技术和碳交易。

碳中和学的理论内涵，包含两个“动态平衡”：第1个“动态平衡”是指一定时期内，全球 CO_2 排放量与吸收量达到动态平衡；第2个“动态平衡”旨在强调，人类赖以生存的自然环境与人类社会发展之间达到动态平衡。

碳中和学的技术内涵，涉及 CO_2 的产生、捕集、输送、利用、封存等全过程技术体系，主要有4个方面的表现：① *减碳技术*，以传统化石能源节能减排技术为主，涵盖化石能源清洁利用、节能提效、资源回收利用等。② *零碳技术*，以无碳排放为基本特征的清洁能源技术，涵盖水能、风能、生物质能、地热能、潮汐能、太阳能等可再生能源，同时还涵盖核能、新材料能源以及具备设备智能、信息对称、系统扁平、多能协调等特征的“智慧能源”。③ *负碳技术*，捕集、利用、封存、转化 CO_2 的技术，以及湿地、冻土、森林、草原、海洋等生态系统固碳技术。④ *碳经济技术*，主要依赖完善的碳税制度、体系化的碳交易市场、公平的复合碳排放权交易体系、调控性的碳财政补贴，以及其他有效的碳产业和碳经济政策等共同构筑。

2.3 碳中和学的框架体系

碳中和学的理论框架体系，以 CO_2 的排放和消除为核心，涵盖了碳中和自然科学和碳中和社会科学。*碳中和自然科学*，包括三大理论基础：① 气候变化理论，目标在于抑制全球气候变暖；② 能源理论，目标在于绿色低碳；③ 碳平衡理论，以CCUS/CCS为核心。*碳中和社会科学*，包括：以碳排放交易体系为核心的碳中和经济理论，以建设人类命运共同体与“绿色地球、宜居家园”为目标的碳中和战略理论等。

碳中和学的技术框架体系，包括碳科学技术和碳经济技术。*碳科学技术*，包括：以化石能源清洁利用、重点行业节能提效、能源系统智慧运行为主的减碳技术；以零碳能源规模利用、能源转化与储能为主的零碳技术；以碳捕集、碳封存、碳利用、碳汇集为主的负碳技术。*碳经济技术*，包括：以碳足迹核算、碳资产评估为主的碳评价技术；以交易制度、交易市场、交易监管为主的碳交易技术。

碳中和学的提出进一步明确“碳中和实施路径”的主要发展方向，树立共建“绿色地球、宜居家园”的终极目标，有助于“碳中和系统科学与技术”学科体系的建设和完善，有助于推动“能源绿色低碳”的

高质量转型，在全球应对气候变化进程中具有里程碑式的意义。

3 我国新能源发展方向和目标

在碳中和愿景下，能源发展目标将以“新能源”+“智能源”体系为主，其具有智能化、清洁化和高效化能源体系特点，同时能源体系的形态、技术、结构、管理等主体要素将发生转变：① 能源形态，将从高碳排放的化石能源向低碳或无碳排放的新能源转变；② 能源技术，将从能源资源型转变为能源技术型，即技术优势替代资源优势成为能源技术的主导；③ 能源结构，以天然能源为主的一次能源消费将被二次能源消费取代主导地位；④ 能源管理，传统式能源管理将逐步被智能化平衡式管理所替代。

碳中和学提出“节能提效”“化石能源低碳化”“清洁能源规模化”“终端用能电气化”“能源系统智慧化”等减碳路径，加大新能源利用是实现清洁能源规模化主要手段，也是实现碳中和目标的必由之路[14]。我国产业结构偏重、能源结构偏煤，更要加大新能源的利用，这对于调整我国能源供给方式，促进能源结构转型，最终实现我国能源独立意义重大。

3.1 新能源是实现碳中和的主要途径

能源作为推动文明发展的基石，在人类文明发展历程中经历3次大的转型[15]：第1次转型是从薪柴时代向煤炭时代转型，第2次转型是煤炭时代向油气时代转型，目前全球正在经历第三次能源转型——由化石能源向新能源转型。前2次能源转型推动了传统工业化进程的历史性跃进，而碳中和驱动的第3次能源转型具备清洁化、低碳化的发展趋势[16]，并将在低碳工业化进程的推动中发挥重要角色。

伴随着世界能源工业中的化石能源消费结构持续调整，新能源消费占比不断升高。截至2021年，全球能源消费中石油占比31%、天然气占比24%、煤炭占比27%、新能源占比18%，形成了“四分天下”的全新能源格局[17]。当前，煤炭、石油、天然气和新能源4种主要能源都进入了各自新的发展时期：煤炭对应“转型期”；石油对应“稳定期”；天然气对应“鼎盛期”；新能源的消费量和占比稳步上升，已经跨入了“黄金期”[16]。当前，新能源的市场竞争力逐步稳定上升，且成本具有逐年缓慢降低的发展趋势。相较于高成本的传统化石能源，“成本领先”这一关键竞争要素从根本上对新能源产业的发展以及传统能源的替代起到了决定性的推动，也是第三次能源转型的重要“内驱力”[18]。

世界主要经济体均加快以新能源为主的能源结构转型调整，构建绿色、低碳、安全、高效的新型能源供应体系。目前，以新能源为主的能源结构转型调整在全球各个国家和地区能源清洁化进程中正在加速展开。欧盟能源供给不足，消费总量已达峰值；1981—2020年，其能源对外依存度由40%上升到46%，能源总产量由9.9亿吨油当量上升到10.0亿吨油当量，消费量由16.6亿吨油当量上升到18.6亿吨油当量。欧盟化石能源匮乏，主要靠大力发展新能源，其新能源消费量在全球新能源消费总量中占比达28%，为世界最高。美国作为能源高消费、高产量型的发达国家，化石能源资源充足，能源供需均衡，其能源转型的中长期战略是减少原煤、稳定原油、加快天然气上产、做大新能源，始终致力于加大新能源发展。日本和韩国化石能源资源匮乏，能源对外依存度均高达94%。日本制定了三阶段建设“氢能社会”发展蓝图，韩国则致力打造“氢经济”。

3.2 中国以煤炭为主“一大三小”到以新能源为主“三小一大”跨越

中国化石能源较丰富，地下能源禀赋决定了

⑤ BP p.l.c. Statistical review of world energy 2022. [2022-06-28]. https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html.

能源消费结构以煤为主，石油、天然气和新能源占比较小。2021 年，煤炭在中国一次能源消费中占比达 56%，石油消费占比 18.5%，天然气消费占比 8.9%，新能源消费占比 16.6%，形成以煤炭消费为主“一大三小”的能源结构⑤。

在碳中和的目标和愿景下，中国不同能源被赋予了新的战略定位：煤炭的开发条件可以适应能源需求变化，不仅具备安全“兜底”的保障责任与任务，更扮演了长远能源战略“储备”的角色；石油的消费水平虽然在中、短期仍会维持稳定增长，但将在未来回归原料属性，在国家能源安全和民生需求方面，分别发挥保障“急需”和稳定“基石”的作用；天然气凭借低碳、稳定、经济的特点，在节能减排过程中不可替代，对国家能源安全发挥“保障”作用，且与新能源具有“共生共荣”的特点，具备最佳“伙伴”作用；新能源在能源保供和国家能源战略层面具有“接替”作用与“主力”作用。

未来在中国实现碳中和的目标时，新能源将在能源消费中占主导——从目前化石能源占比大于 80%，努力争取到 2060 年形成新能源占比 80% 以上；我国能源消费结构将由现阶段“一大三小”（“一大”为煤炭，“三小”为石油、天然气、新能源）完成向“三小一大”（“三小”为煤炭、石油、天然气，“一大”为新能源）的跨越[15,19]。

3.3 力争实现以新能源为主体的“能源独立”

当前，全球能源转型处于重大发展机遇期，新能源的蓬勃发展将与传统化石能源转型相互配合、形成合力，是中国“能源独立”时代到来的唯一路线和必由之路。中国已经位于全球能源消费国首位，同时也是世界第一大能源生产国和碳排放国。“总量大、不清洁、不安全”是我国能源体系的重要结构特征，因此中国“能源独立”战略无法短时间内一蹴而就，而需要系统性、可持续性、稳定性的战略方针。

中国“能源独立”以“洁煤稳油增气、大力发展新能源”为思路，可分“3 步走”实现多种能源互补[18]。① 2020—2035 年，*传统化石能源依然被作为主要能源，与此同时对新能源发展加快提速*。依靠化石资源保障能源供应，同时把握新能源技术革命方向，突破新能源快速发展瓶颈实现该阶段中国“供给安全”。② 2035—2050 年，*实现新能源与煤炭、石油、天然气等传统化石能源协同发展、并重发展*。该阶段工作重点是“调结构、建氢能、争自主”，加快调整使一次能源消费结构趋于合理，依靠“国内生产+海外权益”模式实现“生产自主”。③ 2050年之后，*实施“新能源科技革命和颠覆性技术实现”路径，力争全面实现新能源生产和消费占主导*。煤炭和油气等化石能源消费实现全面降低，产量规模和低廉成本支撑新能源成为能源消费主体。该阶段工作重点是“稳结构、新能源、争独立”，依靠“新能源+智能源”在“能源自主”基础之上，力争实现“能源独立”。

3.4 中国新能源地位与使命

当今世界正经历百年未有之大变局。地球作为人类共同的、唯一的家园，需要各国团结合作来应对诸多环境问题和挑战。中国政府承诺实现碳中和，新能源在实现碳中和发挥主导作用，将推动中国能源消费格局实现“4 个 80%”的转变：2021 年，我国含碳化石能源消费占比 80% 以上（占 83%）、能源 CO_2 排放占比 80% 以上（占 86%）；到 2060 年，我国非碳新能源占比 80% 以上、CO_2 排放减少 80% 以上（从 105 亿吨下降到 20 亿吨左右）[14]。碳中和下新能源被赋予新定位，代表了世界能源转型的方向、能源科技创新的前沿、能源强国建设的主力、绿色地球建设的动力。从资源类型的角度，新能源是一种可再生的清洁能源，而在中国提出碳中和目标后，新能源成为实现碳中和的重要战略；同时，新时代还赋予新能源新的使命，即能源转型的使命、能源安全的使命和能源独立的使命。

4 新能源助力碳中和社会建设

人类社会的发展得益于良好的地球环境。当人类的索取超过了地球的承载能力时，地球的生态环境将会崩溃，人类也会因为丧失唯一的家园而走向灭亡。建设碳中和社会就是为了阻止这种可怕后果，并找到恒久维持地球生态的良方。

碳中和学指出，碳中和的终极目标是建设“绿色地球、宜居家园”，实现人类与地球和谐共生，建成碳中和社会。

4.1 碳中和社会

碳中和社会是人类社会历程中的一个阶段。如果人们通过努力实现了地球生态圈的碳中和，那时的人类社会才能被称为碳中和社会。人类社会的要素中与碳中和直接相关的主要有社会思想、社会行为和社会秩序。

（1）社会思想。在人类社会发展过程中，社会思想也同样在不断演变。从最初对自然的敬畏演化到轻视与“肆无忌惮”，再进一步回归敬畏，这是人类社会思想变化的整体路径。人类对地球生态的破坏，起初是出于无知，随着科学技术的广泛运用逐渐演变为傲慢。碳中和也是一种“亡羊补牢”的措施，是人类从傲慢中醒悟之后采取的保护共同家园的现实行动。

（2）社会行为。工业文明社会当中人类的种种行为造成了自然界碳循环失衡，包括过度生产、扩大需求及过度消费等行为。要彻底解决气候变暖问题，不仅要控制生产过程与社会活动本身的碳排放，还必须改变过度消费与过度生产等社会行为[20]。

（3）社会秩序。循环经济和有限生产，可以在减少整个社会的劳动总量的前提下，维持社会正常运行；文化传承、科学研究与体能强化将成为普通民众的日常必修项目，人们将有限的体力和智慧投入到促进社会发展的文化传承、科技进步和个体健康当中，使人类文明在有限资源条件下更快向前发展。这些社会秩序的重构，是人类在仅有一个地球家园提供资源的条件下保持可持续发展的关键所在，也是未来碳中和社会稳定发展的基础[1]。

4.2 新能源助力碳中和社会建设

地球是人类唯一的家园，人类社会活动造成的碳排放已对生态圈造成影响，每一个人都对碳排放的增加负有责任，恢复地球清洁大气构成也需要每一个人都付出努力。建设碳中和社会是人类拯救地球、拯救人类文明的壮举；建立碳中和社会秩序，弥补以往对地球造成的破坏，需要每个人、每个企业、每个国家的认同和付出。

碳中和是保证地球家园拥有清新的空气、宜人的温度、旺盛的生机、清洁的空间的基本条件⑥。实现碳中和目标的关键点在于能源结构转型。碳中和目标下，碳基能源向非碳基能源跨越，能源体系将加速向低碳化、零碳化转型[21,22]，化石能源逐步由主体能源过渡为保障性能源，新能源将逐步成为主体清洁能源[23]。

碳中和战略目标加速了新能源时代的到来[24]。发展新能源是实现碳中和社会、建设绿色宜居地球的关键，当整个人类社会都被纳入碳中和体系，我们将重新获得并长久拥有一个“绿色地球、宜居家园”。

参考文献

1 邹才能. 碳中和学. 北京: 地质出版社, 2022.
Zou C N. Carbon Neutral Science. Beijing: Geology Press, 2022. (in Chinese)

2 IPCC. IPCC sixth assessment report: Chapter 01. (2021-08-09) [2022-02-26]. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FinalDraft_Chapter01.pdf.

3 Centre for Research on the Epidemiology of Disasters.

⑥ 丁仲礼. 碳中和对中国的挑战和机遇. (2022-01-09). https://mp.weixin.qq.com/s/7xZoE0xfTCv5xXJkSE4AKA.

Disasters in numbers 2021. [2022-05-01]. https://cred.be/sites/default/files/2021_EMDAT_report.pdf.

4 IEA. Global Energy Review: CO_2 Emissions in 2021. [2022-03-09]. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2.

5 邹才能, 薛华庆, 熊波, 等. “碳中和”的内涵、创新与愿景. 天然气工业, 2021, 41(8): 46-57.
Zou C N, Xue H Q, Xiong B, et al. Connotation, innovation and vision of “carbon neutral”. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 46-57. (in Chinese)

6 邹才能, 潘松圻, 马锋. 碳中和目标下世界能源转型与中国能源人新使命. 北京石油管理干部学院学报, 2022, 29(3): 22-32.
Zou C N, Pan S Q, Ma F. The world energy transition and the new mission of Chinese energy people. Journal of Beijing Petroleum Managers Training Institute, 2022, 29(3): 22-32. (in Chinese)

7 IRENA. Bracing for Climate Impact: Renewables as a Climate Change Adaptation Strategy. [2021-08-01]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Aug/IRENA_Bracing_for_climate_impact_2021.pdf.

8 Cattano C, Agostin S, Harvey B P, et al. Changes in fish communities due to benthic habitat shifts under ocean acidification conditions. Science of the Total Environment, 2020, 725: 138501.

9 朴世龙, 岳超, 丁金枝, 等. 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用. 中国科学：地球科学, 2022, 52(7): 1419-1426.
Piao S L, Yue C, Ding J Z, et al. Perspectives on the role of terrestrial ecosystems in the “carbon neutrality” strategy. Science China Earth Sciences, 2022, 65(6): 1178-1186.

10 张飞民, 王澄海, 谢国辉, 等. 气候变化背景下未来全球陆地风、光资源的预估. 干旱气象, 2018, 36(5): 725-732.
Zhang F M, Wang C H, Xie G H, et al. Projection of global wind and solar energy over land under different climate change scenarios during 2020-2030. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(5): 725-732. (in Chinese)

11 Ruosteenoja K, Raisanen P. Seasonal changes in solar radiation and relative humidity in Europe in response to global warming. Journal of Climate, 2013, 26(8): 2467-2481.

12 潘进军, 江滢, 郭鹏, 等. 中国太阳能资源和环境气象因子影响分析. 科技导报, 2014, 32(20): 15-21.
Pan J J, Jiang Y, Guo P, et al. Analysis of China’s solar energy resources and environmental. Science and Technology Review, 2014, 32(20): 15-21. (in Chinese)

13 Energy Daily. 油价暴跌对绿色能源转型的影响. 中外能源, 2020, 25(6): 97.
Energy Daily. The impact of the plunge in oil prices on the green energy transition. Sino-Global Energy, 2020, 25(6): 97. (in Chinese)

14 邹才能, 吴松涛, 杨智, 等. 碳中和战略背景下建设碳工业体系的进展、挑战及意义. 石油勘探与开发, 2022, doi: 10.11698/PED.20220603.
Zou C N, Wu S T, Yang Z, et al. Progress, challenge and significance of building a carbon industry system in the context of carbon neutrality strategy. Petroleum Exploration and Development, 2022, doi: 10.11698/PED.20220603. (in Chinese)

15 邹才能, 熊波, 薛华庆, 等. 新能源在碳中和中的地位与作用. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 411-420.
Zou C N, Xiong B, Xue H Q, et al. The role of new energy in carbon neutral. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 411-420. (in Chinese)

16 邹才能, 赵群, 张国生, 等. 能源革命：从化石能源到新能源. 天然气工业, 2016, 36(1): 1-10.
Zou C N, Zhao Q, Zhang G S, et al. Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era. Natural Gas Industry, 2016, 36(1): 1-10. (in Chinese)

17 邹才能, 潘松圻, 赵群. 论中国“能源独立”战略的内涵、挑战及意义. 石油勘探与开发, 2020, 47(2): 416-426.
Zou C N, Pan S Q, Zhao Q. On the connotation, challenge and significance of China’s “energy independence” strategy. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(2): 416-426. (in Chinese)

18 邹才能, 何东博, 贾成业, 等. 世界能源转型内涵、路径及其对碳中和的意义. 石油学报, 2021, 42(2): 233-247.
Zou C N, He D B, Jia C Y, et al. Connotation and pathway of world energy transition and its significance for carbon neutral.

Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(2): 233-247. (in Chinese)

19 邹才能, 张福东, 郑德温, 等. 人工制氢及氢工业在我国"能源自主"中的战略地位. 天然气工业, 2019, 39(1): 1-10.

Zou C N, Zhang F D, Zheng D W, et al. Strategic role of the synthetic hydrogen production and industry in Energy Independence of China. Nature Gas Industry, 2019, 39(1): 1-10. (in Chinese)

20 见田宗介. 现代社会理论: 信息化、消费化社会的现在与未来. 耀禄, 石平, 译. 北京: 国际文化出版公司, 1998.

Tada S. Modern Social Theory: The Present and Future of Informatization and Consumerization Society. Translated by Yao L, Shi P. Beijing: China International Culture Press, 1998. (in Chinese)

21 杰里米·里夫金. 零碳社会: 生态文明的崛起和全球绿色新政. 赛迪研究院专家组, 译. 北京: 中信出版社, 2020.

Rifkin J. Zero Carbon Society: The Rise of Ecological Civilization and the Global Green New Deal. Translated by CCID Research Institute Expert Group. Beijing: China CITIC Press, 2020. (in Chinese)

22 瓦科拉夫·斯米尔. 能源转型: 数据、历史与未来. 高峰, 江艾欣, 李宏达, 译. 北京: 科学出版社, 2018.

Smil V. Energy Transitions: History, Requirementsand Prospects. Translated by Gao F, Jiang A X, Li H D. Beijing: Science Press, 2018. (in Chinese)

23 傅伯杰. 联合国可持续发展目标与地理科学的历史任务. 科技导报, 2020, 38(13): 19-24.

Fu B J. UN sustainable development goals and historical mission of geography. Science and Technology Review, 2020, 38(13): 19-24. (in Chinese)

24 邹才能, 马锋, 潘松圻, 等. 论地球能源演化与人类发展及碳中和战略. 石油勘探与开发, 2022, 49(2): 411-428.

Zou C N, Ma F, Pan S Q, et al. Earth energy evolution, human development and carbon neutral strategy. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(2): 411-428. (in Chinese)

Mission of New Energy under Carbon Neutrality Goal in China

ZOU Caineng CHEN Yanpeng XIONG Bo LIU Hanlin*

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

Abstract Reducing greenhouse gas emissions, curbing the global temperature rise, and striving to achieve the goal of carbon neutrality are the initiatives and common pursuit of human beings confronting the climate change crisis. Carbon neutrality is a huge systemic project involving multiple disciplines and fields, and it requires a solid theoretical foundation and scientific methods to achieve the goal of carbon neutrality, hence the emergence of carbon neutrality science. The theoretical connotation of carbon neutrality includes two "dynamic balances", namely, the dynamic balance between global carbon emission and carbon absorption, and the dynamic balance between human development and the natural environment, the technical connotation includes the whole process of CO_2 emission, capture, utilization, storage, and removal caused by human production and life, and the related technical system. Under the guidance of carbon neutralization theory, the core of the energy consumption structure needs to transform from fossil energy to new energy, and the world energy production and consumption structure will be transformed from fossil energy to new energy, and the world's energy production and consumption structure will also fundamentally transform from the current "four pillars" including coal, oil, natural gas, and new energy to the new pattern of "three minors and one major" dominated by new energy. In this process, it is indispensable to build a synergistic development of coal, oil, natural gas and new energy. Meanwhile, China's energy production and consumption structure will also undergo a revolutionary change from the current "one major and three minors" dominated by coal energy to the future "three minors and one major" pattern dominated by new energy, and eventually strive to achieve "energy independence". However, in energy development, energy transition and energy security are considered to be on the same level of importance all along. Developing new energy is the key to achieve a sustainable carbon neutral society and building a long-term green and habitable earth.

*Corresponding author

New energy under carbon neutrality is the direction of the world's energy transformation, the frontier of energy scientific and technological innovation, the main force of the development of rejuvenate our country through energy power, and the motivationof the construction of a ecological planet. It shoulders the mission of energy transformation, energy security and "energy independence". When the whole human society is incorporated into the carbon neutral system, we will have a long-term green and habitable earth.

Keywords carbon peak, carbon neutrality, carbon neutralization theory, new energy, energy transition, energy independence, carbon neutral society

邹才能 中国科学院院士。中国石油天然气集团有限公司新能源首席专家，中国石油集团公司国家高端智库研究中心副主任、中国石油深圳新能源研究院院长、中国石油勘探开发研究院副院长。主要从事常规—非常规油气学理论与勘探、能源战略、碳中和等领域研究。E-mail: zcn@petrochina.com.cn

ZOU Caineng Academician of Chinese Academy of Sciences. Scientist-in-Chief on the new energy of CNPC (China National Petroleum Corporation); Vice Director, China Top Think Tank Research Center of CNPC; President of Shenzhen New Energy Research Institute Co. Ltd., PetroChina; Vice President of Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina. He mainly engages in the research of conventional-unconventional hydrocarbon theory and exploration, energy strategy, carbon neutralization and other fields.
E-mail: zcn@petrochina.com.cn

刘翰林 中国石油勘探开发研究院工程师。主要从事非常规油气地质与能源战略综合研究。E-mail: LHLDMC@163.com

LIU Hanlin Engineer at Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina. He mainly engages in unconventional oil and gas geology and comprehensive energy strategy research. E-mail: LHLDMC@163.com.

■责任编辑：岳凌生